

電波天文学特論 II 2008-9

12 銀河系回転計測

12.3 銀河回転と銀河の質量

先に導出した視線速度、接線速度の式を用いて、観測された天体の速度から回転曲線 $\Theta(R)$ を決定することができる。これまでよく用いられてきた方向は、視線速度のみを用いるもので、視線速度および天体の距離の推定値から、回転曲線を求めていた。これは、位置・速度3次元ずつの6次元位相空間情報のうち3次元分 (v_r, l, b) しか得られていない(距離 D は天体の光度を仮定した推定値であることが多い)。一方、VLBIによって高精度の位置計測を行えば、天体距離 D に加えて天体の3次元運動も測定することが可能になり、3次元位置とあわせて6次元の位相空間情報すべてを計測することができる。これによって円運動の仮定さえなしに、銀河系の動力的構造を調べることができる。このような銀河系の精密測量を目指して現在世界では複数の計画が進められており、日本ではVLBIの手法を用いたVERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)が電波での銀河系位置天文計測を目指して進められている。また、欧米ではSIM(Space Interferometry Mission、米国)やGAIA(欧州連合)といった衛星計画で同様の科学研究を目指しており、2020年頃にはこれらの観測データを元にした銀河系研究の新時代が到来する。

銀河系の回転曲線 $\Theta(R)$ が得られると、遠心力と重力のつりあいから銀河系の質量分布を決定することができる。簡単のため球対称な質量分布を仮定し、ある半径以内の質量 (Enclosed Mass) を M_r とする。このような質量分布中を円運動する天体を考えると、遠心力と重力のつりあいより

$$\frac{V^2}{r} = \frac{GM_r}{r^2}, \quad (1)$$

という関係式が成り立つ。ここで V は円運動の速度である。この式を M_r について解くと以下の関係式を得る。

$$M_r = \frac{rV^2}{G} \quad (2)$$

実際の銀河は球対称分布ではないが、質量のオーダー評価としては近似的に式(2)の関係が利用できる。銀河系や一般の銀河を考える際の単位系として、銀河中心距離 R を kpc、回転速度 V を km s^{-1} 、 M_r を太陽質量 $M_\odot (=1.99 \times 10^{30} \text{ kg})$ で表すことが多い。この単位系では

$$M_r = 2.32 \times 10^5 \left(\frac{r}{\text{kpc}} \right) \left(\frac{V}{\text{km s}^{-1}} \right)^2 M_\odot, \quad (3)$$

となる。あるいは、太陽円内の銀河系の質量をオーダー評価するために $r \sim 20$ kpc、 $\Theta \sim 200$ km/s の値を代入すると、

$$M_r \approx 2 \times 10^{11} \left(\frac{r}{20 \text{ kpc}} \right) \left(\frac{V}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 M_\odot,$$

となる。

12.4 銀河系の質量分布

球対照分布の場合には、Enclosed mass M_r と密度 ρ の関係には

$$M_r = \int 4\pi r^2 \rho(r) dr, \quad (4)$$

の関係がある。平坦な回転曲線の場合 $M_r \propto r^1$ だから、

$$\rho(r) \propto r^{-2}, \quad (5)$$

の関係が成り立つことがわかる。一方、円盤銀河の輝度分布は指数関数則にしたがって、

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h), \quad (6)$$

と書けることが知られている。ただし、 h はディスクのスケール長である。銀河系の場合、スケール長 h はおよそ 3 kpc 程度である。円盤の質量 光度比 M/L が円盤の場所によらずに一定だとすれば、輝度分布は質量分布を範囲し、面密度分布 Σ は

$$\Sigma(r) = \Sigma_0 \exp(-r/h), \quad (7)$$

と書ける。指数関数はべき関数に比べて急激に落ちるから、円盤の質量分布だけでは、平坦な回転曲線を維持することはできないことが容易にわかる。すなわち、銀河の平坦な回転曲線を再現するには、暗黒物質が必要である。上に見たように、質量は回転速度の 2 乗に比例するから、回転速度の決定は銀河における暗黒物質の分布や総量の決定に重要である。

12.5 重力マイクロレンズによる暗黒物質探査

暗黒物質の候補は大きくわけて 2 種類に分類される。一つは重力によって物質が集まった暗黒天体であり、もう一つは、相互作用をほとんど起こさない安定な素粒子である。前者のような天体を総称して、マッコ (MACHO: Massive Astrophysical Compact Halo Object) と呼ぶ。一方、後者の相互作用をしない素粒子は WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) と呼ばれる。マッコは重力源として重力マイクロレンズ現象を起こすので、重力レンズ法によるハローの暗黒物質の直接検出がこれまで盛んに試みられてきた。

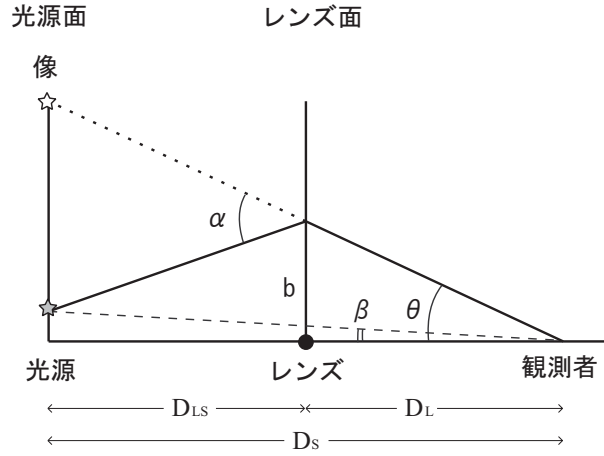


図 1: 重力レンズにおいて、観測者、レンズ、光源の位置関係を表す概略図。

もし暗黒物質が太陽程度の質量を持つコンパクトな天体の場合、その重力場がレンズとして働き、たまたま暗黒物質の背後にあった光源の観測に影響を及ぼす。光源天体、レンズ天体、観測者がそれぞれ図 1 のようにほぼ一直線上に並び、光源が重力レンズを受けている状況を考える。このときの光源の本来の位置角 θ とレンズを受けた像の位置角 β には、以下のような関係がある。

$$\theta - \beta = \alpha \frac{D_{LS}}{D_S}. \quad (8)$$

一方、重力場による光の屈折角 α は、一般相対性理論によれば以下のように書ける。

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}, \quad (9)$$

ここで、 M はレンズ天体の質量であり、 b は光線がレンズに最接近したときの距離である。さらに、アインシュタインリング半径 R_E と、 R_E で規格化したレンズ面上での位置を

$$R_E \equiv \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_L D_{LS}}{D_S} \right)^{1/2}, \quad r \equiv \frac{D_L}{R_E} \theta, \quad u \equiv \frac{D_L}{R_E} \beta, \quad (10)$$

を導入して式 (8) を整理すると、以下のような関係が得られる。

$$r^2 - ur - 1 = 0, \quad (11)$$

この式の解は、2 次方程式の解として次のようになる。

$$r_{1,2} = \frac{u \pm \sqrt{u^2 + 4}}{2} \quad (12)$$

すなわち、質点レンズの場合、像は 2 つ生成される。 $u \ll 1$ の時、 $r_{1,2} \approx \pm 1$ となるから、式 (10) で定義されるアインシュタインリング半径 R_E はレンズ

のおよその大きさを与える。例えば、マゼラン雲 ($D_S = 50$ kpc) 方向のハロー中の天体を考え、天体距離 $D_L = 10$ kpc、レンズ質量 $M = 1M_\odot$ を仮定すると、 $R_E \approx 8$ AU となり、アインシュタインリングの見かけの大きさ $\theta_E \equiv R_E/D_L = 0.8$ mas となる。従って通常の光学望遠鏡の分解能では、マイクロレンズ現象の2つの像を分解することは難しい。

一方、マイクロレンズの2つの像が分解できなくても、2つの像の明るさの和からマイクロレンズ現象を検出することができる。重力レンズは空間の歪みの効果であるため天体の輝度は不変であり、像の増光は、像が引き伸ばされて見かけの大きさが変化するために発生する。質点レンズの場合、像の拡大はレンズと観測者を結ぶ視線に対して回転対称であり、動径方向への拡大によって明るさが変化するので、増光率を A とすると ($A = 1$ がレンズ無しの状態)

$$A_{1,2} = \left| \frac{r_{1,2} dr_{1,2}}{u du} \right| = \left| \frac{r_{1,2}^4}{r_{1,2}^4 - 1} \right|. \quad (13)$$

と書ける。添え字の 1, 2 は式 (12) の解に対応する。2つの像が分解できない時、実際に観測されるのは以下の式で表される2つの像の明るさの和になる。

$$A = |A_1| + |A_2| = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}. \quad (14)$$

$u = 0$ (光源、レンズ、観測者が一直線上にきたとき) に近づくと、 $A \approx u^{-1}$ で無限大に発散する。実際には、光源が有限の大きさを持つので無限大の光度にはならないが、 $u = 0$ に近く、 A が 100 を超えるようなマイクロレンズ現象も実際に観測されている。 $u = \infty$ の時は、レンズがない場合に相当し、もちろん $A = 1$ となる。また、 $u = 1$ の場合 (アインシュタインリングの半径上に光源がある場合)、 $A = 3/\sqrt{5} = 1.34$ となり、3割強の増光率となることがわかる。

12.6 マイクロレンズの光度曲線

マイクロレンズ現象を観測すると、光源とレンズの距離に依存して、式 (14) に従って、光源の見かけの明るさが変化する。光源とレンズが大きさ μ の相対固有運動を持つとき、光源とレンズの角距離 β は

$$\beta = \sqrt{\beta_0^2 + (\mu t)^2}, \quad (15)$$

と書ける。ここで、 β_0 は光源とレンズが最も接近したときの離角で、 t は最接近の時刻を 0 とした時刻である。上の式を式 (10) と同様に規格化すると、

$$u = \sqrt{u_0^2 + (t/t_E)^2}, \quad (16)$$

と表すこともできる。ここで、 t_E はアインシュタイン半径を横切る時間で、

$$t_E \equiv \frac{R_E}{\mu D_L} \quad (17)$$

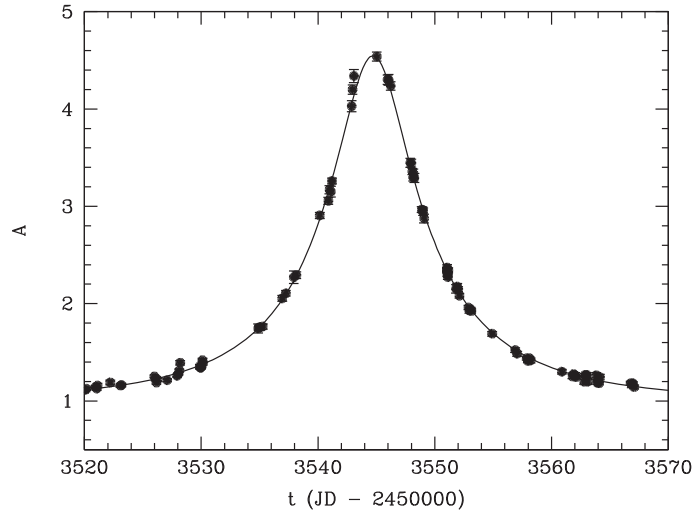


図 2: マイクロレンズの光度曲線の例。MOA による観測点と、理論曲線のフィット。MOA グループのデータより。

である。式 (16) からわかるように、マイクロレンズ現象における光度の時間変化 (光度曲線) は u_0 と t_E で特徴付けられる。式 (14) と式 (16) より計算されるマイクロレンズの光度曲線と実際の観測例を図 (2) に示す。図にあるように、観測されたマイクロレンズ現象は上述の理論式できれいに再現される。

アインシュタイン半径を通過する時間 t_E は、式 (10) および式 (17) よりレンズ天体の質量に依存する。このため、レンズ現象の持続時間の観測からレンズ天体の質量について制限をつけることができる。例として、質量 $M = 1M_\odot$ 、距離 $D_L = 10 \text{ kpc}$ 、速度 $v_\perp \equiv \mu D_L = 200 \text{ km s}^{-1}$ のレンズ天体を考えると、 $t_E \approx 70$ 日となり、数ヶ月間のモニターで光度曲線を追うことができる。

12.7 マイクロレンズの発生確率

マイクロレンズの発生確率を記述する重要な量として、光学的厚み (optical depth) がある。これは任意の視線方向の星を観測したときに、その星がレンズを受けている確率を表す量であり、重力レンズの断面積がアインシュタインリングの面積 πR_E^2 で与えられることから、

$$\tau = \int \pi R_E^2 \frac{\rho}{M} dD, \quad (18)$$

と書くことができる。ここで、 D は視線に沿って計った観測者からの距離を表し、 M はレンズ天体の質量、 ρ はレンズ天体の質量密度分布を表す。アイ

ンシュタイン半径 R_E の式 (10) を式 (18) に代入すると、質量 M が消えて、

$$\tau = \frac{4\pi G}{c^2} \int \rho(D) \frac{D_L(D_S - D_L)}{D_S} dD, \quad (19)$$

という形に書ける。すなわち、マイクロレンズの光学的厚みは天体質量によらず、密度分布 ρ によって決まることがわかる。例として、秒速 200 km s^{-1} の平坦な回転曲線を再現する密度分布 $\rho \propto r^{-2}$ を持つハローの密度分布を考え、マゼラン星雲の方向で $\tau_{\text{exp}} \approx 5 \times 10^{-7}$ 程度となる。すなわちマゼラン星雲方向では 200 万個に 1 個の星がハロー天体による重力レンズ現象を受けていると期待される。

このような手法で銀河系内の暗黒物質を探索する可能性を最初に提唱したのはパチンスキー (B. Paczynski) である。彼の提案を受けて大規模な重力レンズ現象の探索が、最初に MACHO (米豪) と EROS (仏) という 2 つのチームによって実行され、1993 年に初めてマイクロレンズの検出が報告された。次いで、OGLE (ポーランドと米)、MOA (日本とニュージーランド) などのグループも同様の観測を行い、これまでに多数のマイクロレンズ現象が観測されている。特に、MACHO グループは 1992 年から 1999 年にかけての 5.7 年間のモニター観測の結果として、大マゼラン方向で 17 個のマイクロレンズ現象を観測し、この方向のマイクロレンズの光学的厚みを $\tau = 1.2 \times 10^{-7}$ と得た。これは、平坦な回転曲線から期待される τ_{exp} の 25% 程度であり、MACHO だけで銀河系の暗黒物質を説明することは難しい状況にある。また、マイクロレンズの継続時間 t_E の解析から MACHO の典型的な質量として $0.5 M_\odot$ 程度の値が得られているが、その正体についてはまだ明確な答えは得られていない。MACHO がハローに占める割合や、MACHO の質量をより強く制限づけるためには、たくさんのマイクロレンズ現象を発見し、統計的精度を上げることが重要である。現在も MOA や OGLE といった国際共同観測チームがマイクロレンズ探索を続けており、今後さらに精度のよい結果が得られることが期待されている。